**Гибридный нанофотонный модулятор на основе резонансных наночастиц из нитрида кремния и тонких пленок дихалькогенидов переходных металлов**

***Кавер А.К.1, Шепелев Е.А.2, Ситнянский В.А.2, Шорохов А. С.2***

*Студент, 5 курс специалитета*

*1Филиал Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова в городе Севастополе,*

*факультет естественных наук, кафедра физики и геофизики, Севастополь, Россия*

*2Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,*

*физический факультет, Москва, Россия*

*E–mail: kaverak@my.msu.ru*

Современные тенденции развития фотонных и оптоэлектронных технологий требуют создания компактных, энергоэффективных и высокопроизводительных устройств для управления световыми сигналами. Одним из ключевых элементов таких систем являются оптические модуляторы, которые позволяют контролировать интенсивность, фазу или поляризацию света. В последние годы особое внимание уделяется разработке гибридных нанофотонных устройств, сочетающих преимущества кремниевых технологий с уникальными оптическими свойствами функциональных материалов. В этом контексте тонкие пленки дихалькогенидов переходных металлов (TMD, Transition Metal Dichalcogenides) представляют собой перспективную платформу благодаря их исключительным электронным и оптическим характеристикам [1, 2]. TMD материалы, такие как MoX2 и WX2 (X = S, Se) обладают схожими структурами кристаллической решётки и проявляют свойства, зависящие от количества слоев. Так, например, наблюдается переход от непрямой запрещенной зоны к прямой по мере уменьшения количества слоев, что оказывает существенное влияние на оптические характеристики системы [4].

В данной работе предлагается концепция модулятора, состоящего из резонансной волноводной системы (РВС), которая основана на оптическом нанорезонаторе с высокой добротностью магнитного типа, с применением тонких пленок дихалькогенидов переходных металлов. Исследуемая РВС состоит из цепочки наночастиц, размещенных между двумя полосковыми волноводами из нитрида кремния (Si3N4) высотой *h* = 400 нм и шириной *w* = 850 нм на подложке из оксида кремния (SiO2). Выбор материалов обусловлен их оптическими свойствами, в частности наличием области прозрачности в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра. Вся цепочка состоит из левой и правой субволновых брэгговских решеток и центральной резонансной части. Каждая из субволновых брэгговских решеток состоит из десяти равных наночастиц. Период структуры, состоящей из наночастиц и зазоров между ними, составляет 296 нм, где каждая наночастица имеет длину 166 нм. Центральная часть системы включает в себя двадцать наночастиц различной ширины, которая изменяется от 166 нм по краям до 154 нм в центре резонансной полости, что позволяет достичь оптимального профиля ослабления поля гауссовой формы. Общая длина всей центральной части составляет 5,94 мкм. Исследуемая РВС покрывается тонкими пленками TMD материалов. В ходе исследования различных пленок дихалькогенидов переходных металлов были выбраны диселенид молибдена (MoSe2) и диселенид вольфрама (WSe2). Толщины всех пленок в рамках данной структуры изменялись от 1 нм до 10 нм.

Для феноменологического описания изменения оптических характеристик двумерных материалов за счёт лазерной накачки можно использовать модель, в которой показатель поглощения зависит от интенсивности I и интенсивности насыщения Is материала как [1, 2, 3, 5]:

$α=\frac{α\_{0}}{1+I/Is} $ (1)

Действительная часть показателя преломления в первом приближении зависит от интенсивности I следующим образом (оптический эффект Керра):

$n=n\_{0}+n\_{2}∆I$(2)

где n0 – линейный коэффициент отражения, n2– нелинейный показатель преломления, DI– изменение интенсивности света накачки. В рамках данной модели и набора исследуемых материалов, слагаемое, содержащее нелинейный показатель преломления, ввиду порядка малости (~10-6-10-7) относительно линейной части выражения вносит незначительный вклад в изменение действительной части показателя преломления, поэтому в дальнейших расчетах зависимость показателя преломления от интенсивности накачки не учитывается.

Для выбранных материалов была подсчитана зависимость комплексного показателя преломления от интенсивности лазерного излучения, выступающего в роли накачки. Изменение показателя поглощения составило от 1,5\*10-3 до 0,75\*10-3 для диселенида вольфрама и от 1,24\*10-2 до 0,62\*10-2 для диселенида молибдена. В ходе работы было обнаружено, что при добавлении тонких пленок наблюдалось смещение пика резонанса изначальной РВС в длинноволновую область (lres = 956-959 нм).

Результатом численного исследования стал расчёт коэффициента модуляции пропускания системы, максимальное значение которого составило 81 % для плёнки диселенида молибдена и 11 % для плёнки диселенида вольфрама при пиковой интенсивности накачки 121 ГВ\*см-2.

В заключение, предложенная концепция гибридного нанофотонного модулятора на основе резонансной волноводной системы с использованием тонких пленок дихалькогенидов переходных металлов демонстрирует высокий потенциал для управления оптическими сигналами. Численное моделирование показало, что тонкие пленки дихалькогенидов переходных металлов обеспечивают высокую модуляцию пропускания, что может быть использовано в приложениях фотонных и оптоэлектронных технологий.

**Литература**

1. Hsiang-Lin Liu, Chih-Chiang Shen, Sheng-Han Su, Chang-Lung Hsu, Ming-Yang Li, Lain-Jong Li; Optical properties of monolayer transition metal dichalcogenides probed by spectroscopic ellipsometry. Appl. Phys. Lett. 17 November 2014; 105 (20): 201905

2. Munkhbat B. et al. Optical constants of several multilayer transition metal dichalcogenides measured by spectroscopic ellipsometry in the 300–1700 nm range: high index, anisotropy, and hyperbolicity //ACS photonics. – 2022. – Т. 9. – №. 7. – С. 2398-2407.

3. Nardeep Kumar, Jiaqi He, Dawei He, Yongsheng Wang, Hui Zhao; Charge carrier dynamics in bulk MoS2 crystal studied by transient absorption microscopy. J. Appl. Phys. 7 April 2013; 113 (13): 133702.

4. Wang K. et al. Broadband ultrafast nonlinear absorption and nonlinear refraction of layered molybdenum dichalcogenide semiconductors //Nanoscale. – 2014. – Т. 6. – №. 18. – С. 10530-10535.

5. Zhong, C., Li, J. & Lin, H. Graphene-based all-optical modulators. Front. Optoelectron. 13, 114–128 (2020).